

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.314

Шутенко О.В.

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Одним из путей повышения эксплуатационной надежности высоковольтного маслonaполненного оборудования [1], является учет опыта эксплуатации. Как правило, подобный учет сводится к анализу информации о видах дефектов, повреждений и отказов, характерных для того или иного вида оборудования. В тоже время не учтенным является богатейший объем информации заключенный в результатах периодического контроля состояния маслonaполненного оборудования. Так в энергосистеме Украины в эксплуатации находится значительное число высоковольтных трансформаторов имеющих срок службы 40 и более лет, причем по многим из них имеются в наличии результаты периодического контроля с момента ввода в эксплуатацию. Эти данные можно рассматривать как результаты эксперимента по старению изоляции трансформаторов, при этом важным их достоинством является то, что, эти данные получены в результате эксплуатационных воздействий и адекватно отражают реальные процессы старения изоляции. Однако использование этих данных в качестве обучающих выборок возможно лишь после статистической обработки результатов контроля. Важной проблемой возникающей в ходе подобной обработки является обеспечение однородности результатов испытаний.

Данная статья посвящена описанию метода формирования однородных массивов временных рядов, показателей качества трансформаторного масла.

Регрессионная модель для оценки степени старения трансформаторного масла использовалась в [2]. Там же предложена процедура тестовой фильтрации для выделения нестационарных временных рядов показателей качества масла. В работе [3] предложена процедура выделения рядов с искаженным знаком коэффициента парной корреляции показателя на время старения, также выполнена оценка эффективности используемых статистических тестов. Дальнейшее увеличение объема выборочных значений показателей выявило недостаточную эффективность использования только процедур тестовой фильтрации. Так в работе [4], при объеме выборки 6267 значений по 19 показателям масла, массивы данных показателей, сформированные в процессе обработки, уже являлись неоднородными, несмотря на то, что из исходного массива данных были удалены ряды с искаженным знаком коэффициента парной корреляции показателей на время, а также стационарные ряды показателей. Для формирования массивов однородных данных в [4] был использован дисперсионный анализ ковариационных моделей. Недостатком данного метода является детерминированный характер модели, используемой для анализа, что в конечном итоге не позволяет адекватно учесть физические особенности процесса старения масла.

Неоднородность результатов периодического контроля показателей обусловлена, прежде всего, различной скоростью старения масла. Очевидно, что интенсивность старения будет обусловлена как величинами эксплуатационных воздействий (температурой, напряженностью электрического поля, концентрацией кислорода, влаги и других химически агрессивных сред), так и сортом и качеством масла заливаемого в бак трансформатора. Выполненные в работе [5] исследования показали, значимое влияние

загрузки трансформаторов на интенсивность старения трансформаторного масла. Наглядно статистическую неоднородность временных рядов, обусловленных различной нагрузкой трансформаторов и, как следствие, различными температурными условиями работы масла иллюстрирует рис. 1. На данном рисунке приведены зависимости кислотного числа трансформаторного масла от времени эксплуатации для трех трансформаторов: «Ленинская Т-2» Луганскоблэнерго, «Центральная Т-1» Харьковоблэнерго и «Петровская Т-1» Луганскоблэнерго.

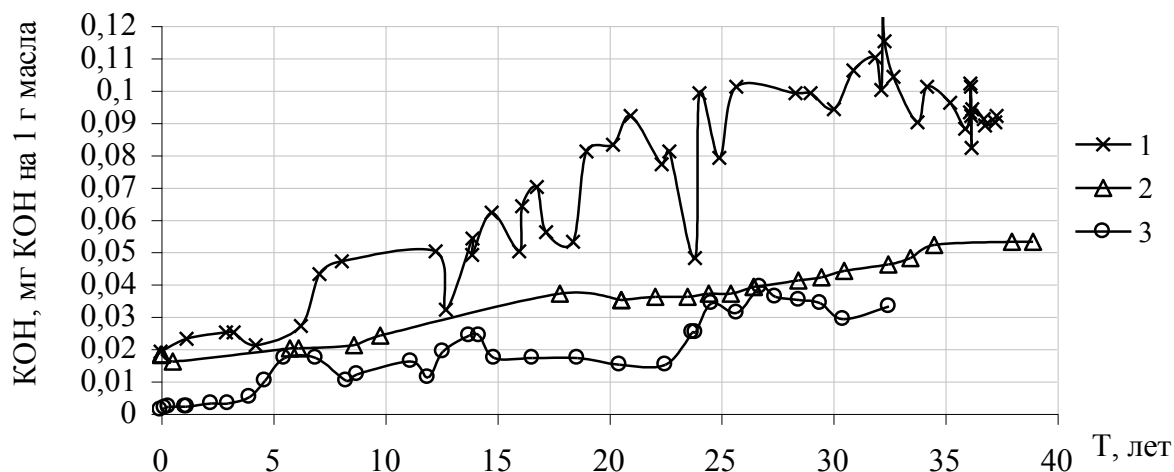


Рисунок 1 – Зависимость кислотного числа трансформаторного масла от времени эксплуатации
1 – трансформатор «Ленинская Т-2» Луганскоблэнерго; 2 – трансформатор «Центральная Т-1» Харьковоблэнерго; 3 – трансформатор «Петровская Т-1» Луганскоблэнерго

Как видно из рис. 1, несмотря на то, что данные трансформаторы отработали приблизительно одинаковый срок, наблюдаются значимые различия значений показателя на каждом временном промежутке. На первом этапе исследований для количественной оценки степени неоднородности результатов испытаний использовался коэффициент парной корреляции показателя на время эксплуатации. Коэффициент корреляции для ряда 1 (трансформатор «Ленинская Т-2»), составляет $r = 0,892$, для второго ряда (трансформатор «Центральная Т-1») $r = 0,987$, а для ряда 3 (трансформатор «Петровская Т-1») $r = 0,916$. В то же время коэффициент корреляции объединенного массива из этих трех рядов $r = 0,739$, что значительно ниже, чем значения коэффициента парной корреляции для отдельного ряда. В данном случае уменьшение значения коэффициента парной корреляции объединенного массива данных обусловлено разными значениями скорости старения масла.

Влияние качества масла, заливаемого в бак трансформатора, на интенсивность старения рассмотрим на примере такого показателя, как температура вспышки масла. На рис. 2 приведены зависимости данного показателя от времени эксплуатации для трансформаторов «Левада Т-1», Харьковоблэнерго, «Полтавгород» Т-4, Полтаваоблэнерго и «Сватово Т-1» Луганскоблэнерго. Коэффициент корреляции для первого ряда (трансформатор «Левада Т-1») составляет $r = -0,912$, для второго ряда (трансформатор «Полтавгород Т-4») $r = -0,805$, а для ряда 3 (трансформатор «Сватово Т-1») $r = -0,928$. В то же время коэффициент корреляции объединенного массива из этих трех рядов $r = -0,393$. Из рис. 2 видно, что подобное резкое уменьшение коэффициента парной корреляции при объединении трех рядов в один массив обусловлено статистической неоднородностью объединяемых массивов из-за различного сорта и качества масла, залитого в бак трансформаторов.

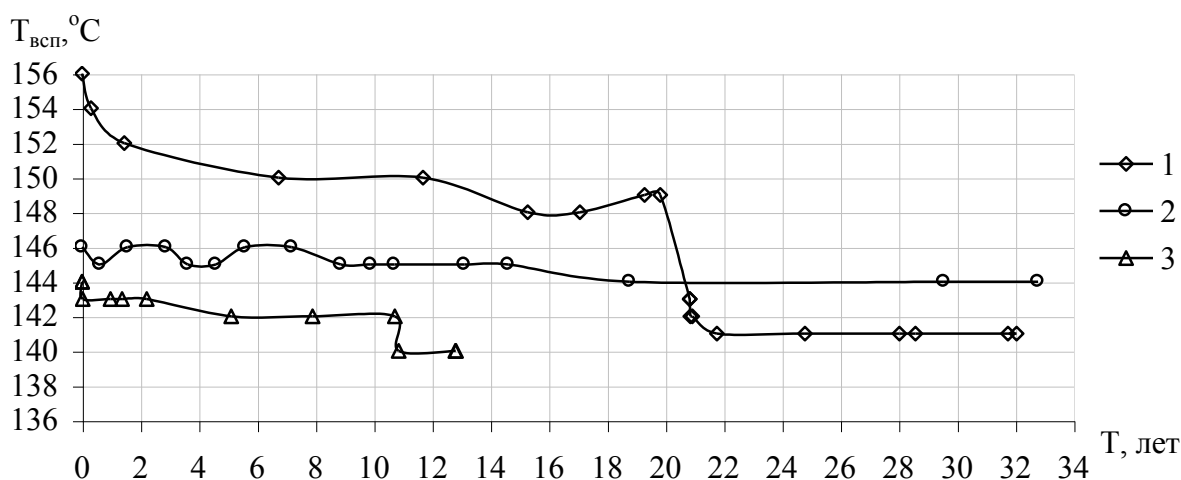


Рисунок 2 – Зависимость температуры вспышки трансформаторного масла от времени эксплуатации; 1 – трансформатор «Левада Т-1», Харьковоблэнерго; 2 – трансформатор «Полтавгород Т-4», Полтаваоблэнерго; 3 – трансформатор «Сватово Т-1», Луганскоблэнерго

Приведенные примеры показывают, что объединение неоднородных временных рядов в общий массив данных приводит к резкому искажению статистических характеристик выборки. При этом основными причинами неоднородности временных рядов показателей качества масла являются разные условия эксплуатации (загрузка трансформаторов, характер потребителя, режимы работы сети и т.д.) и различие в качестве масла (тип масла, его качество на момент заливки и т.д.).

Задача формирования статистически однородных временных рядов показателей сводится к выбору временных последовательностей, для которых сорт и качество трансформаторного масла, а также условия его эксплуатации совпадали. Наблюдаемое в нашем случае изменение средних значений показателей качества масла происходит под действием многих факторов, причем количественный уровень воздействия этих факторов неизвестен, что значительно усложняет задачу формирования статистически однородных последовательностей. В таких условиях, когда не известны ни количественные уровни воздействия факторов, ни вид функциональной зависимости, целесообразней всего решать обратную задачу, т.е. подбирать временные ряды таким образом, чтобы они обеспечивали минимальный разброс относительно предполагаемой линии тренда. Поскольку вид этой линии не известен, необходимо подобрать такую статистическую характеристику, которая, с одной стороны, давала бы информацию о тесноте стохастической связи между показателем и временем эксплуатации (тем самым бы обеспечивала условие однородности на всем интервале наблюдения показателя) и в то же время не была бы привязана к кривой определенного вида. Такой характеристикой может являться выборочное корреляционное отношение [6], которое служит для оценки тесноты нелинейной корреляционной связи между величинами X и Y и определяется как отношение межгруппового среднего квадратичного отклонения к общему среднему квадратичному отклонению величины Y :

$$\eta_{yx} = \frac{\sigma_{\hat{y}_x}}{\sigma_y} = \frac{\sigma_{\hat{y}_x}^2}{\sigma_y^2} \quad (1)$$

Межгрупповое среднее квадратичное отклонение определяется как:

$$\sigma_{\bar{y}_x} = \sqrt{\frac{\sum n_x \cdot (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{n}}. \quad (2)$$

Общее среднее квадратичное отклонение определяется как:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum n_y \cdot (y - \bar{y})^2}{n}}, \quad (3)$$

где n – объем выборки; n_x – частота значения x величины X ; n_y – частота значения y величины Y ; \bar{y} – общее среднее величины Y ; \bar{y}_x – условная средняя величины Y , т.е. среднее арифметическое наблюдавшихся значений Y соответствующих $X = x$.

Использование величины корреляционного отношения [6], в качестве меры однородности временных рядов составляющих массив данных, можно обосновать с точки зрения следующих позиций. Поскольку все значения величины Y разбиты на группы (временные интервалы), то можно представить общую дисперсию признака в виде суммы внутригрупповой и межгрупповой дисперсий:

$$\sigma_{i \text{ аф}}^2 = \sigma_{i \text{ аф}}^2 + \sigma_{i \text{ аф}}^2. \quad (4)$$

Преобразуем выражение (4) следующим образом:

$$\sigma_{i \text{ аф}}^2 = \sigma_{i \text{ аф}}^2 \cdot \left[1 - \frac{\sigma_{i \text{ аф}}^2}{\sigma_{i \text{ аф}}^2} \right]. \quad (5)$$

Или же с учетом (1):

$$\sigma_{i \text{ аф}}^2 = \sigma_{i \text{ аф}}^2 \cdot [1 - \eta_{yx}^2]. \quad (6)$$

Как видно из (6) в случае, если $\eta_{yx} \rightarrow 1$, то $\sigma_{i \text{ аф}}^2 \rightarrow 0$, следовательно, стремятся к нулю и каждая из групповых дисперсий, что естественно говорит о повышении однородности общего массива данных. Таким образом, задача формирования массива статистически однородных временных рядов сводится к отысканию такой комбинации временных рядов показателя, которая бы обеспечивала максимальное значение величины корреляционного отношения на заданном временном интервале. Для решения данной задачи была разработана следующая последовательность формирования массива однородных данных. Для каждого временного ряда показателя качества масла рассчитывались значения коэффициентов парной корреляции. Полученные значения коэффициентов парной корреляции ранжировались по убыванию. В качестве базового ряда выбирался временной ряд показателя, для которого наблюдалось максимальное значение

ние коэффициента парной корреляции на наибольшем интервале наблюдений. После чего к базовому ряду добавлялся следующий ряд, имеющий максимальное значение коэффициента парной корреляции, и определялось корреляционное отношение объединенного ряда. В случае, если значение корреляционного отношения объединенного ряда уменьшалось, ряды признавались не однородными и к базовому добавлялся следующий ряд. После выполнения проверки базового ряда с последним рядом в массиве данного показателя, формируется следующий массив однородных данных этого же показателя, из данных, не вошедших в предыдущий массив, в аналогичной последовательности.

Эффективность предложенного метода формирования однородных массивов данных проиллюстрируем на примере такого показателя, как кислотное число масла. Исходный массив данных, обозначим его как M_a , представляет собой выборку объемом 2313 значений, полученную по результатам контроля кислотного числа 157 трансформаторов по Донецкой, Луганской, Сумской, Полтавской и Харьковской областям Украины, а также АР Крым. В результате отсева временных рядов с отрицательным знаком коэффициента парной корреляции и стационарных рядов, был сформирован массив данных, обозначим его как M_f . Объем данного массива составил 1541 значение для 100 трансформаторов. Графически зависимость кислотного числа от времени эксплуатации для массива данных M_f приведена на рис. 3. Как видно из данного рисунка, несмотря на отсев искаженных и стационарных временных, полученный в результате фильтрации массив данных является неоднородным, что затрудняет поиск вида зависимости данного показателя от времени эксплуатации.

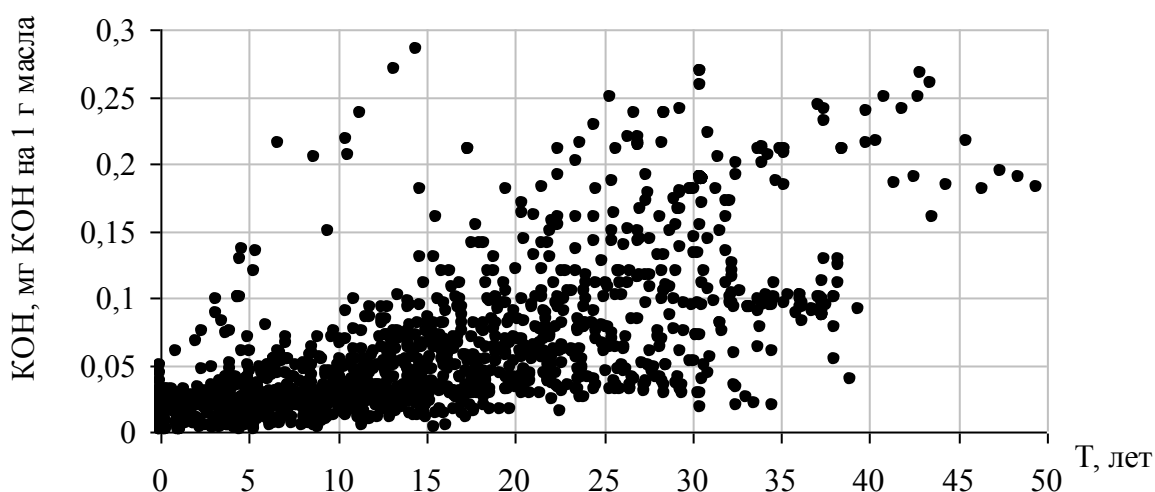


Рисунок 3 – Зависимость кислотного числа трансформаторного масла от времени эксплуатации для массива M_f , полученного в результате обработки исходного массива данных

Используя приведенную выше последовательность формирования массивов однородных данных, из массива M_f были сформированы 4 массива данных, для которых значения корреляционного отношения были максимальными. Количество рядов, объем выборочных значений, значения коэффициентов парной корреляции и значения корреляционного отношения для всех анализируемых массивов данных приведены в табл. 1.

Как видно из данной таблицы, на каждом этапе обработки данных происходит увеличение значений коэффициента парной корреляции и корреляционного отношения, что свидетельствует о повышении однородности данных. Что наглядно иллюстрирует

рисунок 4, на котором приведена зависимость кислотного числа для массива данных M_2 , полученного из массива M_f .

Таблица 1 – Результаты проверки статистических гипотез о старении трансформаторного масла

Массив данных	Количество рядов	Объем выборки	r	η_{x-t}
Ma	157	2313	0,598	0,623
Mf	100	1541	0,684	0,715
M_1	30	546	0,911	0,930
M_2	30	513	0,908	0,924
M_3	29	324	0,901	0,918
M_4	11	156	0,869	0,891

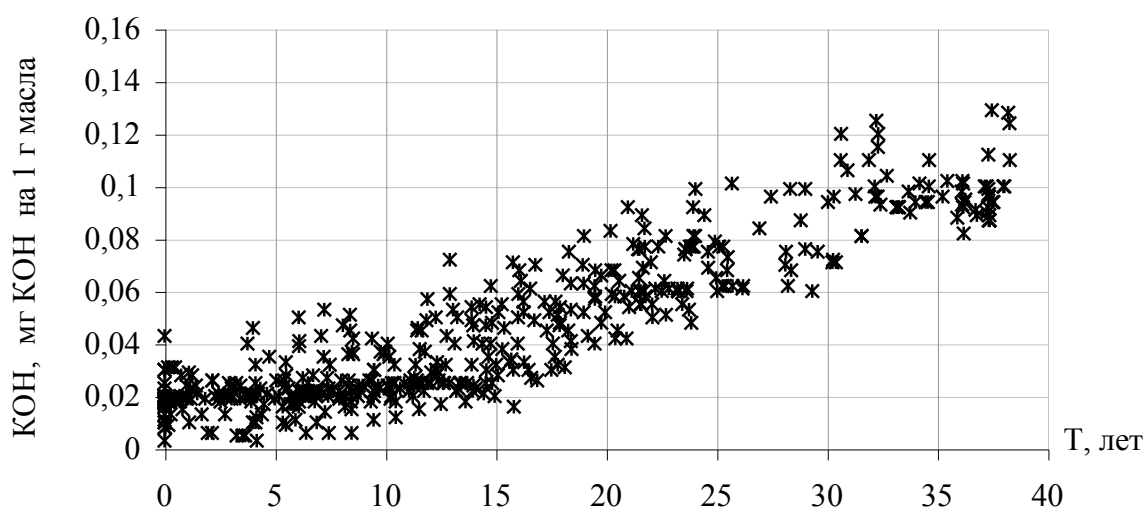


Рисунок 4 – Зависимость кислотного числа трансформаторного масла от времени эксплуатации для массива M_2 , полученного в результате выделения однородных рядов из массива данных M_f

Из рисунка 4 видно, что дисперсия результатов измерений сохраняется неизменной на всем участке эксплуатации. Вид зависимости кислотного числа масла от времени эксплуатации можно получить, выполнив процедуру квантования данных (процедура, эквивалентная кусочно-линейной фильтрации на заданных интервалах наблюдения). На рис.5 приведены зависимости кислотного числа от времени эксплуатации для 4-х массивов данных, квантованных с шагом 1 год. Как видно из рисунка 5, полученные зависимости кислотного числа от времени эксплуатации имеют четко выраженный нелинейный характер и совпадают с кинетическими кривыми окисляемости масел, полученными в [7] по результатам ускоренного старения масла. Для полученных зависимостей как и в [7] можно четко дифференцировать следующие периоды процесса: начальная стадия, в течение которой не наблюдается видимых изменений масла, – это так называемый индукционный период. Вслед за периодом индукции процесс вступает в автокаталитическую стадию – в период самоускорения реакции. Затем наступает период постоянной скорости процесса, в котором скорости реакций образования и гибели свободных радикалов равны. Когда концентрация этих продуктов оказывается достаточной, наступает последний период процесса – период самоторможения.

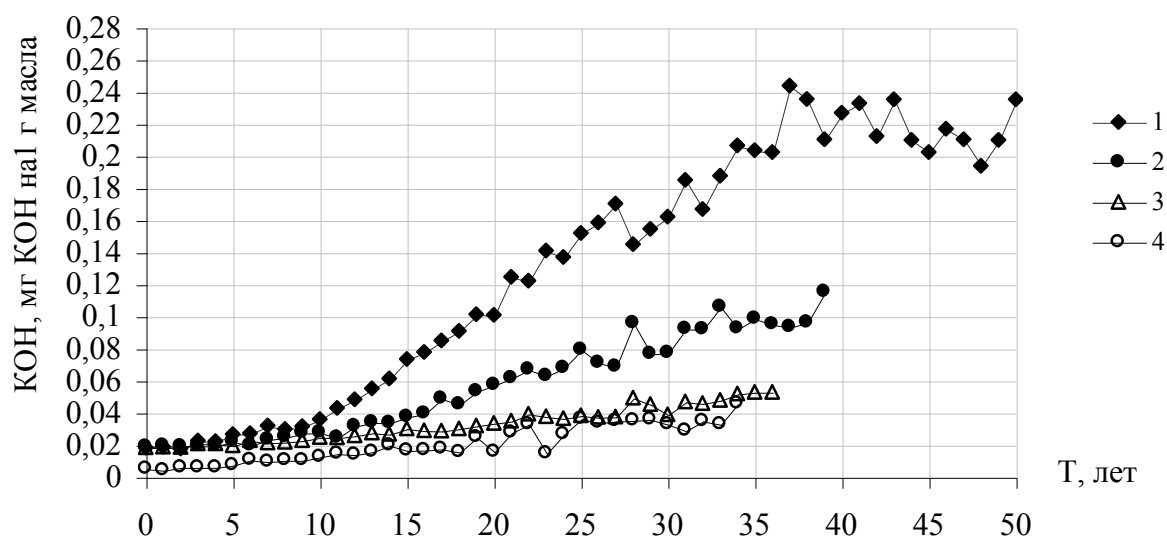


Рисунок 5 – Зависимость кислотного числа трансформаторного масла от времени эксплуатации для массивов однородных данных, квантованных с шагом 1 год
1 – массив M_1 ; 2 – массив M_2 ; 3 – массив M_3 ; 4 – массив M_4

Как видно из рис. 5, наименьшее значение индукционного периода и максимальное значение скорости изменения показателя характерно для кривой 1 (массив M_1). Этот массив в основном составляют трансформаторы Донецкой и Луганской областей, а также некоторые трансформаторы Харьковской области, введенные в эксплуатацию в конце 50-х, в начале 60-х годов. Для кривой 2 индукционный период несколько продолжительней, этот массив (массив M_2) в основном составляют трансформаторы Харьковской области и АР Крым. Наиболее длительным индукционным периодом обладают кривые 3 и 4 (массив M_3 и M_4) трансформаторы Полтавской и Сумской областей (кривая 3), и трансформаторы с маслом ТУ 31.101.890-81, имеющие более низкие значения кислотного числа на момент заливки (кривая 4). Такое распределение по регионам во многом может быть объяснено различным составом потребителя, что и определяет вместе с коэффициентом загрузки температурный режим работы изоляции. Очевидно, что для регионов с большим содержанием промышленных потребителей интенсивность окисления масла будет выше, что наглядно иллюстрирует рис. 5.

Выводы

Неоднородность показателей качества масла, полученных в результате периодического контроля состояния жидкой изоляции трансформаторов, обусловлена различными условиями эксплуатации и разным качеством масла, заливаемого в бак трансформатора. Для формирования однородных массивов показателей качества масла предложен метод максимума корреляционного отношения показателя на время эксплуатации. Практическая реализация метода на примере кислотного числа масла показала его высокую эффективность, что позволяет использовать данный метод для формирования однородных массивов данных и по другим показателям.

Дальнейшим этапом работы является подбор адекватных зависимостей показателей качества масла от времени эксплуатации, а также синтез регрессионных моделей для оценки степени старения трансформаторного масла и прогнозирования его остаточного ресурса.

Литература

1. Силовые трансформаторы. Справочная книга под ред. Лоханина А. К., Лизунова С. Д. – М. «Энергоиздат» 2004, С. 407–434.
2. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла, для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, №2, Харьков.– 2003., С. 46–50.
3. Шутенко О.В. Оценка информативности показателей качества трансформаторного масла при эксплуатационном контроле технического состояния изоляции высоковольтных трансформаторов // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника, Харьков НТУ «ХПИ», 2004, №7, – С. 88–98.
4. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов// Технічна електродинаміка, Тематичний випуск Силова електроніка та енергоефективність, Частина 5, Київ., 2006., С. 88–93.
5. Шутенко О.В. «Исследование влияния загрузки трансформатора на состояние масла в процессе эксплуатации». // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника. Харьков НТУ «ХПИ», 2004.– №7 С. 121–126.
6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1977.– 479 с.
7. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983.– 296 с.

УДК 621.314

Шутенко О.В.

**ФОРМУВАННЯ ОДНОРІДНИХ МАСИВІВ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В УМОВАХ АПРІОРНОЇ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ**

Досліджено вплив умов експлуатації трансформаторного масла на однорідність результатів випробувань. Запропонований метод для формування масивів однорідних даних показників якості трансформаторного масла. Доведена його ефективність.